黄河源草地退化区2种鼠丘土壤风蚀规律

翟 辉[1]， 李国荣[1,2]， 李进芳[1]， 朱海丽[1,2]， 赵健赟[1,2]，
刘亚斌[1,2]， 陈文婷[1,2]， 胡夏嵩[1,2]

（1. 青海大学地质工程系，青海 西宁 810016；
2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室，青海 西宁 810016）

摘 要：为阐明高寒草地啮齿类动物活动区鼠丘土壤风蚀特征和规律，以青海省河南县鼠害退化区高原鼠兔和高原鼢鼠鼠丘为研究对象，采用野外模拟风力侵蚀试验方法，对2类鼠丘土壤风蚀流失量和养分流失量的特征和规律进行研究，并对该2种鼠丘土壤风蚀差异进行对比和分析。结果表明：(1) 在9 $m \cdot s^{-1}$的恒风速吹蚀作用下，2种鼠丘土壤颗粒的快速流失主要集中在前15 min内，且高原鼠兔鼠丘土壤流失量显著高于高原鼢鼠鼠丘，约为高原鼢鼠鼠丘土壤流失量的1.5倍。(2) 蠕移是鼠丘土壤流失最主要的运动方式，相同时间内2种鼠丘均呈现蠕移量>跃移量>悬移量，其中高原鼠兔鼠丘蠕移量、跃移量和悬移量分别为高原鼢鼠鼠丘的1.45倍、1.58倍、1.50倍。(3) 鼠丘土壤养分含量明显低于原生草地土壤层，且养分含量呈现出原生草地土壤>高原鼠兔鼠丘土壤>高原鼢鼠鼠丘土壤。(4) 鼠丘土壤养分流失和土壤流失具有相同的规律，养分流失主要取决于土壤颗粒的流失，高原鼠兔鼠丘的各养分含量指标的流失量较高原鼢鼠鼠丘增加1.42~3.53倍。研究结果将为阐述鼠害退化区土壤流失特征，揭示高寒草地退化机理和黄河源草地生态环境保护提供理论依据。

关键词：黄河源区；草地退化区；鼠丘；土壤风蚀；养分流失

黄河源区分布着大量的高寒草地，是该地区生态系统中的重要资源[1]，约占源区面积的80%左右[2]。由于该区域独特的地理位置以及在全球气候变化、啮齿类动物活动及人类活动等综合影响下，高寒草地已经出现不同程度的土壤侵蚀和草地退化现象[3]。受季节性气候的影响，每年约有7~8个月高寒草地表层处于干旱、半干旱状态[4-5]，致使风蚀作用在土壤侵蚀中占主导作用，成为黄河源区草地土壤侵蚀的主要原因之一[6-8]。长期的风蚀作用使得草地表层土壤颗粒不断流失，造成草地土壤粗粒化现象[9-11]。诸多学者针对土壤风蚀作用及其影响因子等方面进行了研究[12-15]，提出影响草地土壤风蚀强度的主要因素有风速大小[16-17]、植被盖度[18-19]以及土壤结构和土壤粒径组成等。黄河源高寒草地区域广泛分布小型啮齿类动物，其对草地植被和土壤产生一定的扰动作用。未扰动的草地植被覆盖度较高，土壤结构稳定、密实[20]，风蚀作用不明显，相比之下，在啮齿类动物扰动下草地表面堆积形态各异的裸露鼠丘，其土壤结构完全被破坏[21-24]。

诸多学者研究认为，啮齿类动物对草地的破坏主要体现在啃食植被和掘土造穴活动，其会改变原生草地的土壤理化性质，导致植被枯死，致使草地产生退化秃斑[25-26]，在风力吹蚀作用下极易造成土壤流失[27-28]，从而加剧区域生态失衡和草地退化[29-32]。野外调查发现，高寒草地区域分布的小型啮齿类动物主要为高原鼠兔（*Ochotona curzoniae*）和高原鼢鼠（*Eospalax baileyi*），其体积大小和生活习性等有明显区别，其形成的鼠丘形态大小和土壤粒径组成存在较大差异，2种鼠丘对风力侵蚀的响应程度也存在较大的差异。有关鼠丘土壤风蚀方面的研究相对较少[4,33]，针对2种鼠丘原位风蚀特征及其差异性等方面的对比分析有待深入研究。因此，为查明黄河源区鼠丘土壤风蚀特征和规律以及不同种类鼠丘土壤风蚀存在的差异，本文以黄河源区高寒草地高

收稿日期：2022-03-17； **修订日期：**2022-05-11
基金项目：青海省科技厅基础研究项目(2021-ZJ-701)；国家自然科学基金项目(41662023，42161068，42062019)
作者简介：翟辉(1997-)，男，硕士研究生，研究方向为地质灾害及其防治. E-mail: 1838334135@qq.com
通讯作者：李国荣. E-mail: qdliguorong@163.com

原鼠兔和高原鼢鼠活动堆积的鼠丘为研究对象,通过开展原位风蚀试验,在同等风速条件下对比分析2种鼠丘表面的土壤及其养分流失规律,为揭示高寒草地鼠丘分布区风蚀机理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区在黄河源区的黄南州河南县南旗村周边,地理位置为101°47′E、34°44′N,海拔约3600 m[34]。黄河源区地处北半球中纬度西风带,其特殊的地理位置和高海拔,气候相对恶劣,干旱少雨,属于典型的高原大陆性季风气候,大风天气频繁且强烈,属于风蚀强烈作用区,最大风速可达20 m·s^{-1},年平均风速2.6 m·s^{-1}。年平均气温在−1.3~1.6 ℃,年降雨量597.1~615.5 mm,且年降雨量有逐年降低的趋势,但冬季略呈增加趋势[35]。在风蚀、水蚀和冻融侵蚀等作用下研究区已经出现水土流失和草地退化现象[36−37]。在草地上大量分布着啮齿类动物,其中以高原鼠兔和高原鼢鼠为主,其中鼠兔密度为0.36个·m^{-2}[24],鼠类活动使得草地出现大量的鼠丘(图1和图2),鼠丘平均密度可达370个·hm^{-2},鼠洞平均密度可达950个·hm^{-2},随着鼠丘土壤的不断侵蚀,最终形成裸地和退化秃斑[4,21]。2种鼠丘外部形态均多呈半球形,其中高原鼠兔鼠丘相对平缓,平均高度8 cm,直径约45 cm,鼠丘堆积于高原鼠兔洞口;高原鼢鼠鼠丘平均高度约12 cm,直径约35 cm,鼠洞位于鼠丘底部被鼠丘土壤覆盖。



图1　高原鼢鼠活动产生的鼠丘

Fig. 1　Rodent mounds produced by the activity of *Eospalax baileyi*



图2　高原鼠兔活动堆积的鼠丘

Fig. 2　Rodent mounds produced by the activity of *Ochotona curzoniae*

1.2　试验设计与方法

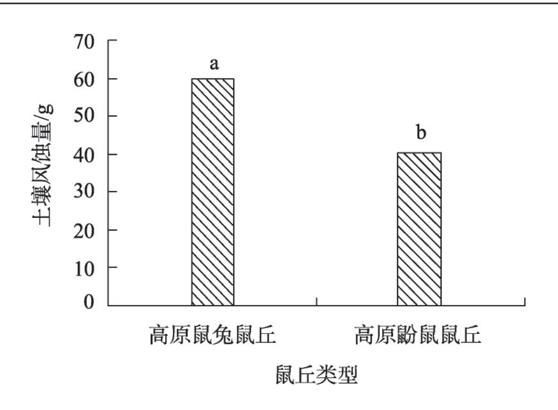
野外试验主要以高原鼠兔和高原鼢鼠活动堆积的鼠丘为研究对象,通过调查2种鼠丘大小和形态后,分别选择未结皮、未受牲畜和人为干扰,且表面积相近的10个独立鼠丘作为重复试样,然后采用人工模拟风蚀试验装置分别对不同鼠丘土壤进行恒定风速的风蚀试验。该试验在2021年5—6月进行,此期间小型动物活动比较活跃,产生的鼠丘均为新鲜的、未经过长期侵蚀的鼠丘,而且研究区草地解冻后的时间不长,降雨甚少且多风,鼠丘表面极易产生土壤风蚀作用。

人工模拟风蚀试验主要由风箱、蓄电池、电线以及土壤收集器等组成(图3),试验时将风箱和土壤颗粒收集器分别安置在鼠丘两侧,即吹风口对准鼠丘,土壤颗粒收集器安置在鼠丘另一侧,与鼠丘的水平距离均为50 cm。每个试验从风箱启动开始计数,风蚀时间设定为60 min,模拟风速大小为9 m·s^{-1}(据试验区气象站获取的大风天气气象资料设定)。土壤收集器为方形,采用等距分层收集的形式对各运移高度范围内的土壤颗粒进行收集,每层高度为5 cm,每层的进砂截面为5 cm×80 cm,在其余3面设置了通风孔,并在背部采用纱布遮挡,以确保运移沉积的土壤颗粒不会流失或发生回旋倒流。由于土壤颗粒在风力侵蚀作用下的运移形式主要分为蠕移、跃移和悬移[38],根据前人风沙运移理论研究,蠕移主要发生在近地面,跃移颗粒运移高度一般在10 cm以内[39],悬移颗粒运移高度大于10 cm。根据野外反复试验和观测结果显示,在收集器最低层,即0~5 cm高度范围内,收集的颗粒物粒



图3　原位风蚀试验装置

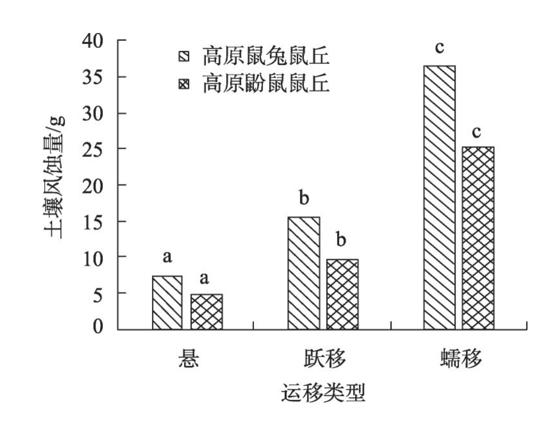
Fig. 3　In situ wind erosion test device



注:不同小写字母表示2种鼠丘风蚀量差异显著 $P<0.05$。

图4　2种鼠丘土壤总流失量对比

Fig. 4　Comparison of total soil loss between two kinds of rodent mounds



注:不同小写字母表示同一鼠丘3种运移形式的风蚀量差异显著 $P<0.05$。

图5　2种鼠丘土壤不同运移量的对比

Fig. 5　Comparison of different soil transport between two kinds of rodent mounds

径>0.5 mm,根据Bagnold[40]对风蚀产物的划分,粒径>0.5 mm的风蚀物为蠕移颗粒物。因此,本次试验研究中将距离草地地面5 cm高度范围内运移的土壤颗粒视为蠕移颗粒,将距离草地地面5~10 cm范围内运移的土壤颗粒视为跃移颗粒,将距离草地地面10 cm以上范围内运移的土壤颗粒视为悬移颗粒,风蚀试验开始后,每隔5 min对每层收集的土壤颗粒进行采集和分析。为定量评价风蚀对鼠丘土壤养分的影响,对原生草地和鼠丘土壤养分含量进行了测试,并统计分析养分含量随土壤风蚀量的流失规律,其中养分流失量通过土壤颗粒流失量与鼠丘表层土壤养分初始浓度计算获得,土壤养分的测试指标包括全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质。

2　结果与分析

2.1　2种鼠丘土壤风蚀作用的对比

2.1.1　2种鼠丘土壤总流失量的比较　由图4可知,鼠兔鼠丘土壤颗粒流失量明显高于高原鼢鼠鼠丘($P<0.05$),即在历时60 min的恒风速吹蚀作用下,高原鼠兔土壤颗粒流失总量为59.625 g,约是高原鼢鼠鼠丘流失量的1.5倍。高原鼠兔鼠丘土壤蠕移、跃移和悬移的土壤流失总量分别是高原鼢鼠鼠丘的1.45倍、1.58倍和1.50倍。高原鼠兔鼠丘的蠕移、跃移和悬移流失量分别占总流失量的61.0%、26.2%和12.8%,高原鼢鼠鼠丘的蠕移、跃移和悬移流失量分别占总流失量的62.7%、24.6%和12.7%(图5)。2种鼠丘在颗粒流失总量上存在差异,但在相同的风速吹蚀作用下,2种鼠丘土壤流失运移高度所占比例非常接近,土壤颗粒运移高度所占的比例和风速大小有关,与鼠丘形态大小的关系不明显。

2.1.2　2种鼠丘土壤流失规律的比较　风蚀试验中流失土壤颗粒的统计分析结果得出,高原鼠兔和高原鼢鼠的鼠丘土壤流失量均呈现出前15 min快速流失,其流失的土壤量分别占各自总流失量的60.76%、60.31%,而吹蚀15 min后2种鼠丘土壤的流失速率逐渐降低(图6)。从图7可以看出,2种鼠丘土壤流失的递减量均随风力侵蚀时间的增加而逐渐降低,也反映出15 min内是鼠丘土壤风蚀最敏感的时期,且鼠兔鼠丘土壤颗粒流失量明显高于高原鼢鼠鼠丘。此外,从图7中还可以看出,吹蚀30 min后,2种鼠丘土壤的流失量的递减速率逐渐趋于接近,且出现微弱的波动现象。

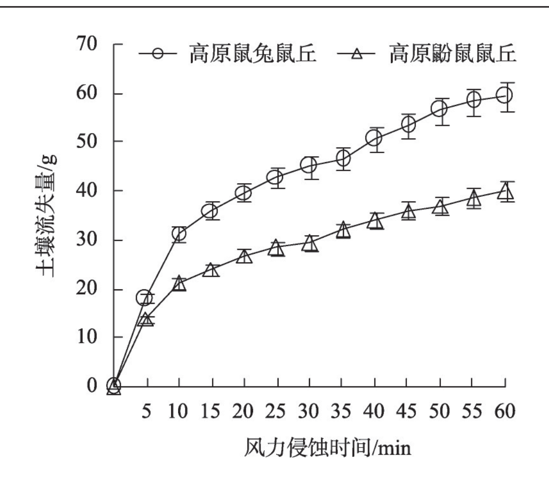


图6　2种鼠丘土壤总流失量随时间的变化

Fig. 6 Variation of total soil loss over time in two rodent mounds

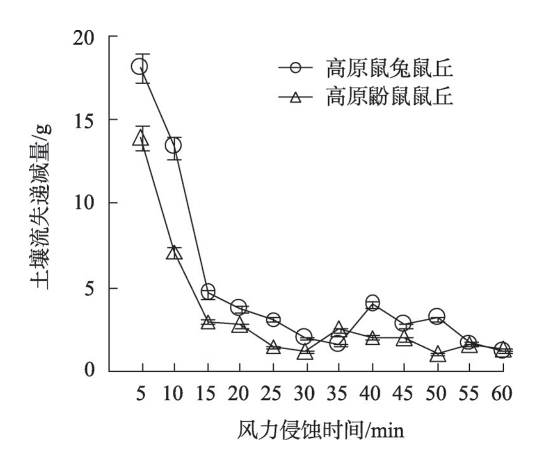
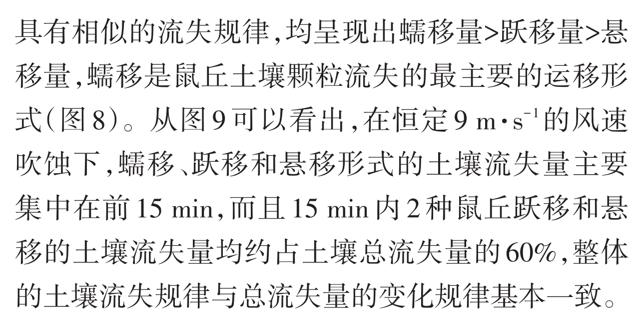


图7　2种鼠丘土壤流失量随时间的递减规律

Fig. 7 Decrease law of soil loss over time in two rodent mounds

2.1.3 2种鼠丘土壤在不同运移形式下的流失规律比较　从鼠丘表面土壤运移方式的角度分析，高原鼠兔和高原鼢鼠鼠丘表面3种运移方式的土壤颗粒

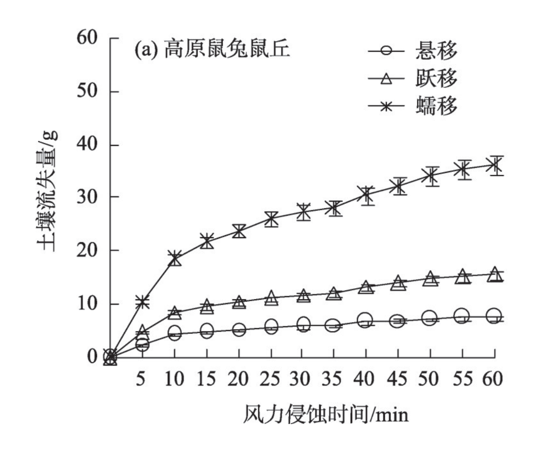


具有相似的流失规律，均呈现出蠕移量>跃移量>悬移量，蠕移是鼠丘土壤颗粒流失的最主要的运移形式（图8）。从图9可以看出，在恒定9 m·s^{-1}的风速吹蚀下，蠕移、跃移和悬移形式的土壤流失量主要集中在前15 min，而且15 min内2种鼠丘跃移和悬移的土壤流失量均约占土壤总流失量的60%，整体的土壤流失规律与总流失量的变化规律基本一致。

2.2 风蚀作用下2种鼠丘土壤养分流失规律对比

由表1可知，研究区土壤养分含量总体呈现出原生草地土壤>高原鼠兔鼠丘土壤>高原鼢鼠鼠丘土壤。除全钾含量无明显变化外，2种鼠丘土壤中的全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质含量均明显低于原生草地表层土壤（$P<0.05$），其平均降低的幅度分别为41.15%、21.60%、21.90%、36.87%、33.74%、43.19%。此外，除全钾含量外，高原鼢鼠和高原的鼠丘养分也有显著的差异（$P<0.05$），相比之下，高原鼠兔鼠丘土壤中各养分指标的含量均是高原鼢鼠鼠丘土壤的1.03~2.38倍。

在风蚀作用下，鼠丘土壤中的养分含量随着土壤颗粒的流失而流失，且高原鼠兔和高原鼢鼠的鼠丘养分在土壤颗粒中的分布相对均匀，即土壤养分含量的流失量与土壤颗粒的流失量呈正比，即土壤风蚀量越大，则鼠丘表面流失的土壤养分越大（图10）。从图10可以看出，在吹蚀前10~15 min内土壤有机质、全钾、碱解氮、速效钾的流失量快速增加，而后增加速率逐渐降低，全氮、全磷和速效磷的流失量随时间变化不明显，2种鼠丘土壤养分流失量整体呈现出：有机质>全钾>全氮>全磷>碱解氮>速效钾>速效磷，分析认为产生这一规律主要与鼠丘土壤中本身具有的各养分指标含量的高低有关，即



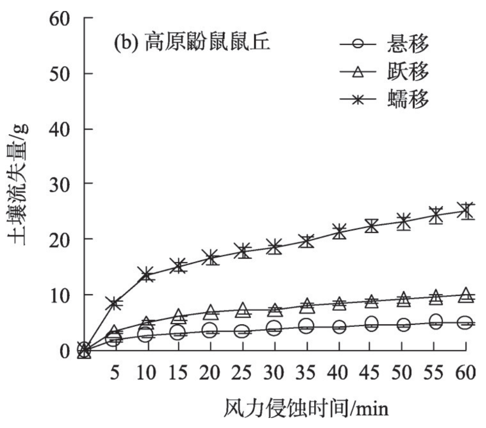


图8　2种鼠丘土壤不同运移方式下的流失规律对比

Fig. 8 Comparison of soil loss rules under different migration modes of two kinds of rodent mounds

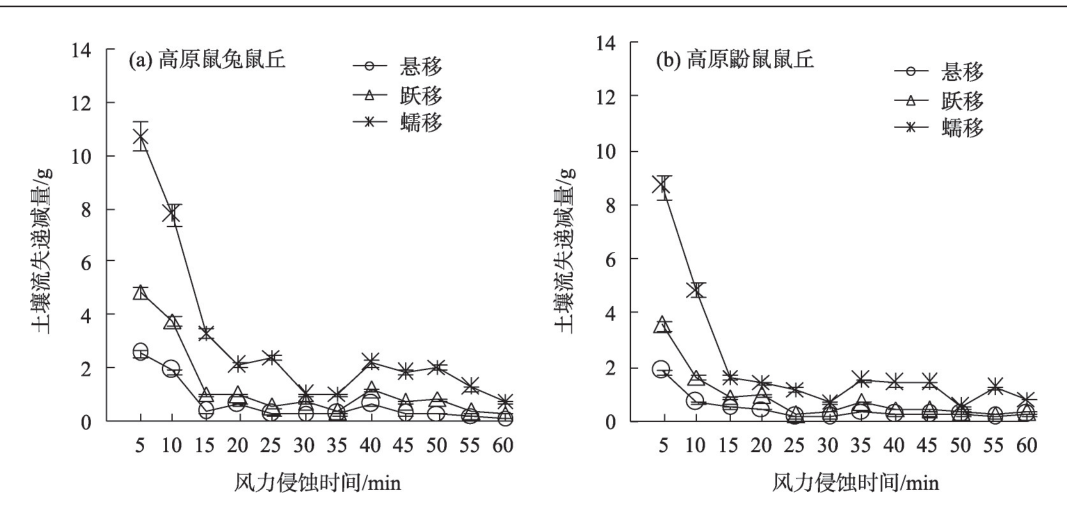


图9 2种鼠丘土壤不同运移方式下的流失递减量对比

Fig. 9 Comparison of soil erosion decrease under different migration modes of two kinds of rodent mounds soil

表1 原生草地与2种鼠丘土壤养分的测试结果

Tab. 1 Test results of soil nutrients in native grassland and two rodent mounds

类别	全氮 /(g·kg⁻¹)	全磷 /(g·kg⁻¹)	全钾 /(g·kg⁻¹)	碱解氮 /(mg·kg⁻¹)	速效磷 /(mg·kg⁻¹)	速效钾 /(mg·kg⁻¹)	有机质 /(g·kg⁻¹)
原生草地	2.88	1.62	19.59	210	9.9	163	55.26
高原鼠兔鼠丘	2	1.29	19.53	200	6.9	152	38.01
高原鼢鼠鼠丘	1.39	1.25	20.5	128	5.6	64	24.78

土壤颗粒中积累的养分含量越多，土壤颗粒流失越多，则养分的流失量就越大。此外，对比图10和图11中2种鼠丘的养分流失规律发现，2种鼠丘的土壤养分流失规律与土壤颗粒的流失规律基本一致，且高原鼠兔鼠丘各养分指标的流失量也显著高于高原鼢鼠鼠丘，结合试验数据分析得出高原鼠兔鼠丘土壤的全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质流失量分别是高原鼢鼠鼠丘土壤养分流失量的2.14倍、1.53倍、1.42倍、2.32倍、1.83倍、3.53倍、2.28倍。

为了说明2种鼠丘土壤养分流失规律的差异性，数据统计中也对2种鼠丘在单位时间内土壤养分流失递减幅度进行了对比分析。试验结果表明，鼠丘在单位时间内土壤养分流失的递减量和图7中

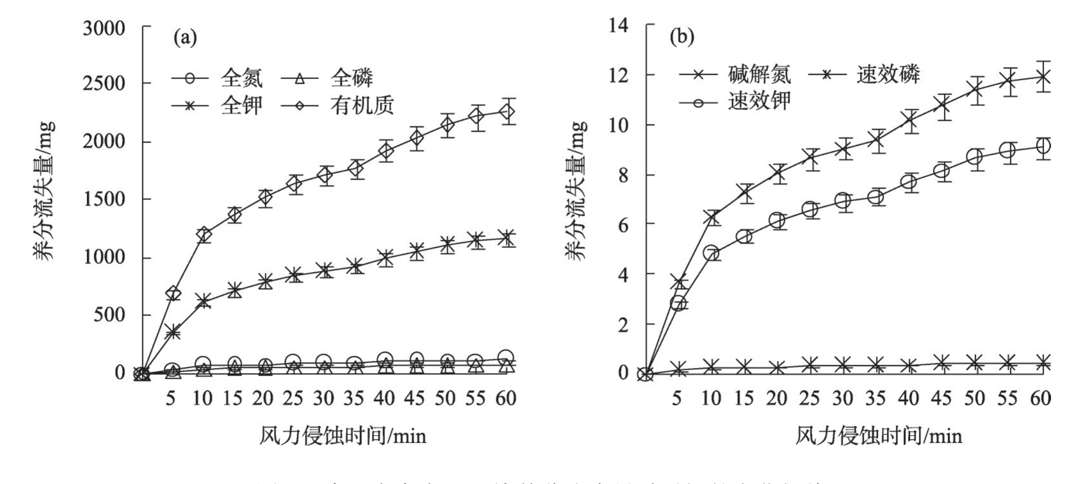


图10 高原鼠兔鼠丘土壤养分流失量随时间的变化规律

Fig. 10 Changes of soil nutrient loss over time in *Ochotona curzoniae* mound on plateau

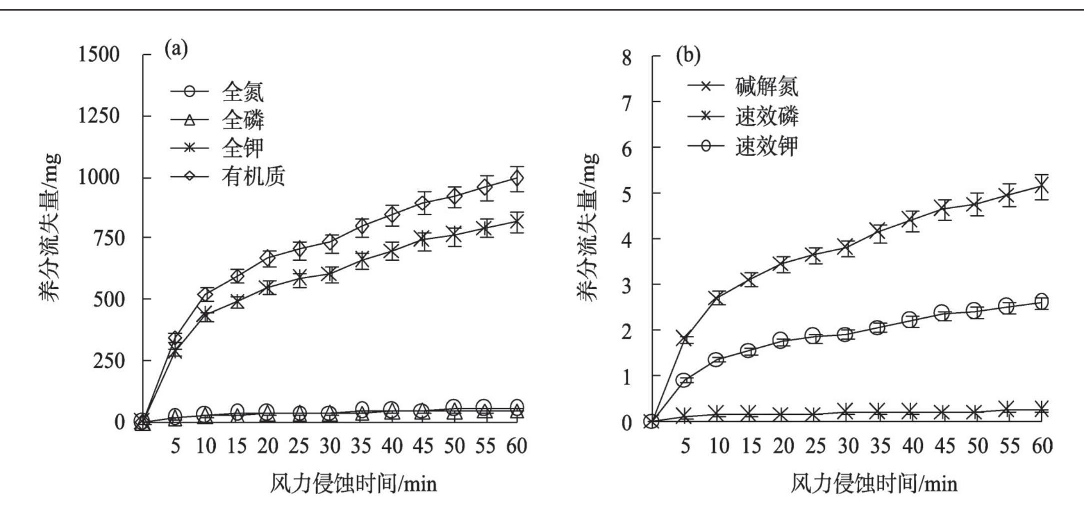


图11　高原鼢鼠鼠丘土壤养分流失量随时间的变化规律

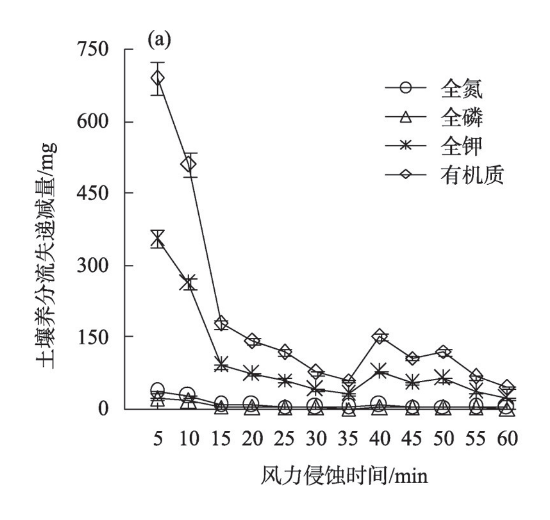
Fig. 11　Changes of soil nutrient loss in *Eospalax baileyi* mound with time

土壤颗粒流失特征基本一致,即各养分指标含量的流失量均在前15 min内极为明显,15 min后趋于平缓(图12、图13)。从图中可以看出,在风蚀前15 min内,2种鼠丘土壤有机质、全钾、碱解氮和速效钾的流失递减量较大,全氮、全磷和速效磷的流失递减量较小。对比分析2种鼠丘,高原鼠兔鼠丘的土壤养分随风蚀时间的流失递减率在15 min内明显大于高原鼢鼠鼠丘,而15 min后2种鼠丘土壤养分的流失速率逐渐接近,这与鼠丘表面土壤颗粒的流失量和流失速率密切相关。

3　讨论

3.1　鼠丘土壤风蚀与草地退化的关系

高寒草地鼠害爆发导致的黄河源区土壤流失问题已成为黄河源区草地退化的重要原因,鼠类活动与草地退化的关系密切,鼠丘分布区的土壤流失问题是研究高寒草地退化的一个不可忽视的因素。高原鼠兔和高原鼢鼠的活动及其堆积大量松散鼠丘,在风力作用下加剧了啮齿类动物活动区土壤颗粒和养分的流失,是导致草地退化和土壤退化的关键因素。通过研究发现,鼠丘分布区相比于其他退化区的侵蚀现象更加明显,被小型啮齿类动物破坏的土壤结构已经在很大程度上丧失了草地土层的完整性和稳定性,鼠丘土壤颗粒之间缺乏根与土、土与土等之间的粘结作用,而且鼠丘土壤的侵蚀介于沙漠风蚀和草地风蚀之间,可视为土壤流失中有充足物源的侵蚀体,在高寒草地区由于季节性大风、多风天气而造成大量的土壤颗粒和养分流



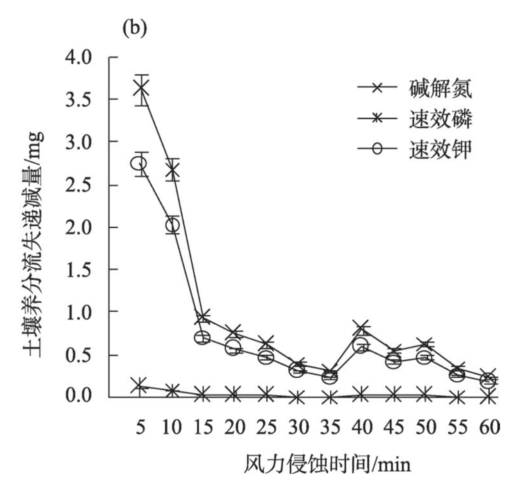


图12　高原鼠兔鼠丘土壤养分流失随时间的递减规律

Fig. 12　Decrease of soil nutrient loss in *Ochotona curzoniae* mound over time

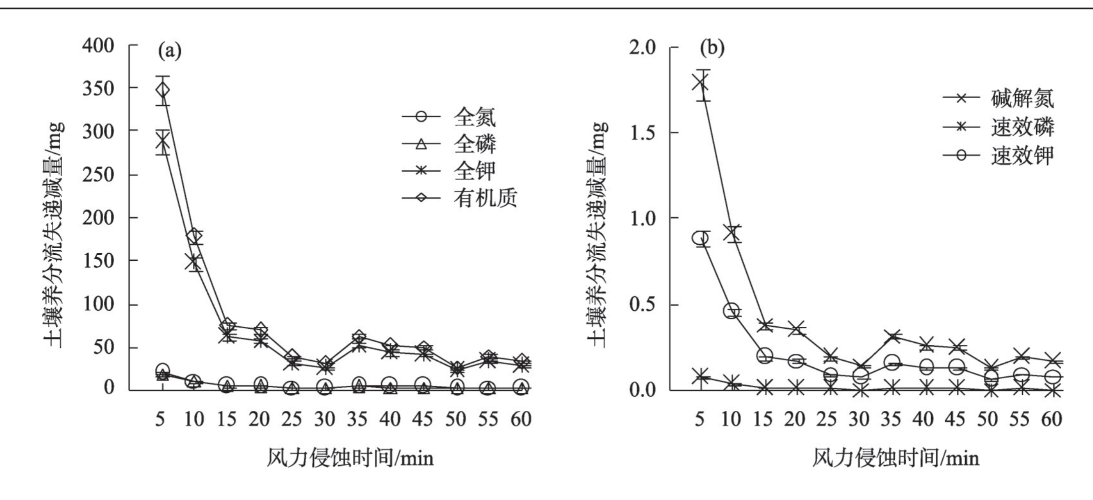


图13　高原鼢鼠鼠丘土壤养分流失随时间的递减规律

Fig. 13　Decreasing law of soil nutrient loss in *Eospalax baileyi* mound with time

失，由此引发土壤层变薄或营养元素丢失，致使草地土壤贫瘠，植被很难在鼠丘分布区自然恢复生长，而且在长期的土壤侵蚀过程中土壤颗粒量越来越少，土层中的沙粒不断积累，这也反映出土壤风蚀是导致草地退化的重要原因之一。在长期的啮齿类动物机械破坏和风蚀作用下，草地植被遭到破坏，鼠丘形态因土壤流失而逐渐趋于平缓且土壤贫瘠，导致草地退化加剧，致使该地区植被的自然恢复能力降低。

3.2　2种鼠丘差异与土壤风蚀

2种鼠丘在同一区域，鼠丘土壤类型一致，在试验结果中2种鼠丘土壤风蚀规律出现差异性的主要原因是鼠丘土壤粒径组成的差异。通过对2种新生鼠丘表层土壤进行颗粒分析，在采用干筛法且对鼠丘土壤团聚体未造成破坏的情况下，高原鼠兔鼠丘土壤粗团聚体组成低于高原鼢鼠鼠丘，细颗粒含量显著高于高原鼢鼠鼠丘。此外，导致2种鼠丘土壤风蚀量差异性的主要原因是高原鼢鼠在地下相对较深的土层中活动，它们将深层相对贫瘠的土壤从洞穴中推出地表，堆积形成土壤粒径相对较粗的鼠丘。相比之下，高原鼠兔的体型较小，对土壤层及颗粒团聚体的破坏较严重，鼠丘中单颗粒土壤的比例略高于高原鼢鼠鼠丘，极易被吹蚀，其掘穴深度较浅，甚至在地表挖掘土壤和草根，最终形成相对低缓、土壤颗粒相对细小、富含大量有机物质和熟土的鼠丘，因此高原鼠兔不同运移方式下的土壤及养分流失量均大于高原鼠兔鼠丘。根据鼠丘表面的观察和分析认为，2种鼠丘表面土壤及其养分的流失递减量在15 min后出现，上述波动现象的主要原因是鼠丘中存在大量的被鼠类咬断的植物根系，这些根系的部分根段暴露在表面，并在风蚀作用下因摆动而产生对其周围土壤颗粒的轻微拨动，迫使小颗粒土壤随风流失，而产生了土壤流失速率略有增加的现象。

3.3　与扰动模拟试验数据的对比分析

本试验是采用人工模拟风蚀试验装置对草地自然鼠丘进行原位吹蚀，而李国荣等[4]将高原鼠兔的鼠丘移至风蚀盘内进行了风蚀试验，对比2种试验数据后发现，原位鼠丘土壤流失量显著低于人为扰动的鼠丘。分析认为，天然鼠丘被人为移至风蚀盘内，尽管经人工修复后鼠丘形态大小与自然鼠丘相接近，但在实际操作过程中很难还原出原位鼠丘的原始状态，鼠丘本身经过轻微的扰动，难免会破坏原有鼠丘土壤的团聚体组成以及土壤颗粒在鼠丘表面的分布特征，因此表面的土壤颗粒更容易被吹蚀。相比之下，本次试验是对自然鼠丘进行的原位风蚀试验，即鼠丘的结构及土壤颗粒没有经过人为的二次扰动，所测得的土壤及其养分流失量要比实际流失量低。

4　结　论

（1）在60 min的恒风吹蚀作用下，鼠丘土壤的流失量呈先快后慢的趋势，显示高原鼠兔鼠丘的土壤颗粒流失量高于高原鼢鼠鼠丘，约是高原鼢鼠鼠丘土壤流失量的1.5倍，这与2种啮齿动物的体型大小、生活习性及对土层的机械破坏程度有关。

（2）2种鼠丘各运移形式的流失量均表现为内

蠕移量>跃移量>悬移量。高原鼠兔鼠丘的蠕移、跃移和悬移流失量分别占总流失量的61.0%、26.2%和12.8%,高原鼢鼠鼠丘的蠕移、跃移和悬移流失量分别占总流失量的62.7%、24.6%和12.7%,蠕移是鼠丘土壤流失最主要的运动方式。

(3)在9 $m\cdot s^{-1}$的恒风速吹蚀作用下,高原鼠兔和高原鼢鼠的鼠丘土壤流失量均呈现出前15 min快速流失,15 min后流失速率逐渐降低,在前15 min内土壤流失量分别占总土壤流失量的60.76%、60.31%。高原鼠兔鼠丘各运移形式的流失量均大于高原鼢鼠鼠丘,且高原鼠兔鼠丘悬移、跃移和蠕移流失量分别是高原鼢鼠鼠丘的1.50倍、1.58倍、1.45倍。

(4)鼠丘土壤养分含量明显低于原生草地土层,且土壤养分含量的流失量与土壤颗粒的流失量呈正比,高原鼠兔鼠丘的土壤各养分指标的流失量是高原鼢鼠鼠丘1.42~3.53倍,高原鼠兔活动对土壤退化的影响相对较大。

参考文献(References):

[1] Miehe G, Schleuss P, Elke S, et al. The Kobresia pygmaea ecosystem of the Tibetan highlands: Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem *Kobresia pastures* of Tibet[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 754−771.

[2] 李国荣, 李希来, 陈文婷, 等. 黄河源区退化草地水土流失规律[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 51−55. [Li Guorong, Li Xilai, Chen Wenting, et al. Experimental study on soil erosion rule of degraded grassland in source area of the Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 51−55.]

[3] 杨馥铖, 刘昌义, 胡夏嵩, 等.黄河源区不同退化程度高寒草地理化性质及复合体抗剪强度研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 560−571. [Yang Fucheng, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Study on physical and chemical properties and shear strength characteristics of root-soil composite system with different degradation degrees of alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 560−571.]

[4] 李国荣, 李希来, 李进芳, 等. 黄河源高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 110−114, 168. [Li Guorong, Li Xilai, Li Jinfang, et al. Soil wind erosion law in *Ochotona curzoniae* mound of alpine meadow in the Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 110−114, 168.]

[5] 刘义花, 王振宇, 刘彩红, 等. 气候变暖背景下青海省春季干旱时空变化[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 282−290. [Liu Yihua, Wang Zhenyu, Liu Caihong, et al. Research on the variation characteristics of spring drought in the Qinghai Province under the background of climate warming[J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (2): 282−290.]

[6] 吴成永, 陈克龙, 曹广超, 等. 近30年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J]. 地理研究, 2018, 37(4): 717−730. [Wu Chengyong, Chen Kelong, Cao Guangchao, et al. The spatial and temporal differences and driving forces of wind erosion climatic erosivity in Qinghai Province from 1984 to 2013[J]. Geographical Research, 2018, 37(4): 717−730.]

[7] Teng Y M, Zhan J Y, Liu W, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 107340.

[8] Guo Z L, Huang N, Dong Z B, et al. Wind erosion induced soil degradation in northern China: status, measures and perspective[J]. Sustainability, 2014, 6(12): 8951−8966.

[9] 张正偲, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(12): 86−89. [Zhang Zhengcai, Dong Zhibao. The effect of wind erosion on the surface particle size[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(12): 86−89.]

[10] 张惜伟, 汪季, 高永, 等.呼伦贝尔沙质草原风蚀坑表层土壤粒度特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 293−299. [Zhang Xiwei, Wang Ji, Gao Yong, et al. Grain size characteristics of topsoil in blowouts on sandy grasslands in Hulun Buir[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 293−299.]

[11] 蒙仲举, 王猛, 王淮亮, 等. 基于数字成像技术的风蚀地表颗粒空间异质性[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1270−1277. [Meng Zhongju, Wang Meng, Wang Huailiang, et al. Spatial heterogenity of soil particles on wind erosion surface based on digital imaging technology[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1270−1277.]

[12] 毛旭芮,杨建军,曹月娥,等.土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 1−7. [Mao Xurui, Yang Jianjun, Cao Yue'e, et al. Wind tunnel study of soil crust area and distribution affecting on wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 1−7.]

[13] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J].水土保持研究, 2006, 13(4): 37−39. [Shang Runyang, Qi Youxiang, Zhao Tingning, et al. Field investigation on the influence of vegetation on wind and soil erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(4): 37−39.]

[14] Meng Z J, Dang X G, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(4): 1−14.

[15] 李昂, 高天鹏, 张鸣, 等. 西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 120−123. [Li Ang, Gao Tianpeng, Zhang Ming, et al. Influences of vegetation cover on dynamic changes of soil wind erosion in wind erosion region of Northwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (6): 120−123.]

[16] 刘铁军, 赵显波, 赵爱国, 等. 东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J].水土保持学报, 2013, 27(2): 67−70. [Liu Tiejun, Zhao Xianbo, Zhao Aiguo, et al. An experimental study of wind erosion wind tunnel simulation on the black soil in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 67−70.]
[17] 岳高伟, 贾慧娜, 蔺海晓. 土壤风蚀过程颗粒释放机理研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 248−253. [Yue Gaowei, Jia Huina, Lin Haixiao. Release mechanism of soil particles in soil wind erosion [J]. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 248−253.]
[18] 邢恩德, 马少薇, 郭建英, 等. 植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J]. 水土保持学报, 2015, 22(6): 331−334. [Xing Ende, Ma Shaowei, Guo Jianying, et al. Effect of vegetation cover on sandstorm structure and rate of wind erosion in typical steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 331−334.]
[19] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of northern China[J]. Plant and Soil, 2013, 369(1): 585−598.
[20] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J].干旱区研究, 2021, 38(2): 392−401. [Shen Ziyan, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 392−401.]
[21] Li G R, Li X L, Li J F, et al. Influences of plateau zokor burrowing on soil erosion and nutrient loss in alpine meadows in the Yellow River source zone of west China[J]. Water, 2019, 11(11): 1−16.
[22] 刘文玲, 马育军, 吴艺楠, 等. 青海湖流域高原鼠兔扰动对不同地表类型土壤水分特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 62−69. [Liu Wenling, Ma Yujun, Wu Yi'nan, et al. Effects of plateau pika's disturbance on soil moisture characteristics of different land surface types in Qinghai Lake watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(2): 62−69.]
[23] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 不同形成时间鼢鼠鼠丘土壤水力学性质的对比[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 180−184. [Wang Honglan, Jiang Shunyuan, Cui Junfang, et al. Hydraulic properties of zokor mounds with different forming time in zoige grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 180−184.]
[24] 谈静, 才文代吉, 王海春, 等. 青藏高原高寒草甸鼠丘剥蚀特征及影响因素[J]. 中国草地学报, 2020, 42(1): 147−153. [Tan Jing, Cai Wendaiji, Wang Haichun, et al. Comparative study on erosion characteristics and influencing factors of pika mound soil in alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 147−153.]
[25] 周延山, 花立民, 楚彬, 等. 祁连山东段高原鼢鼠对高寒草甸危害评价[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5922−5930. [Zhou Yanshan, Hua Limin, Chu Bin, et al. Assessment of damage caused by plateau zokor to an alpine meadow in eastern Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5922−5930.]
[26] Chen J J, Yi S H, Yu Q. The contribution of plateau pika disturbance and erosion on patchy alpine grassland soil on the Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for grassland restoration[J]. Geoderma, 2017, 297: 1−9.
[27] Pang X P, Guo Z G. Plateau pika disturbances alter plant productivity and soil nutrients in alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. The Rangeland Journal, 2017, 39(2): 133−144.
[28] Pan T, Zou X T, Liu Y J, et al. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Engineering, 2017, 108: 307−317.
[29] Hafzullah A, Ebru E, Gokmen T. Empirical sediment transport models based on indoor rainfall simulation and erosion flume experimental data[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28: 1320−1328.
[30] Momm H G, Wells R R, Bennett S J. Disaggregating soil erosion processes within an evolving experimental landscape[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43: 543−552.
[31] Bardgett D, Bullock M, Lavorel S, et al. Combatting global grassland degradation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 10(2): 720−735.
[32] 张卫红, 苗彦军, 赵玉红, 等. 高原鼠兔对西藏邦杰塘高寒草甸的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 115−122. [Zhang Weihong, Miao Yanjun, Zhao Yuhong, et al. Effects of plateau pika *(Ochotona curzoniae)* on alpine meadow in Tibet[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(1): 115−122.]
[33] 马素洁, 周建伟, 王福成, 等. 高寒草甸区高原鼢鼠新生土丘水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 58−63. [Ma Sujie, Zhou Jianwei, Wang Fucheng, et al. Effect of soil erosion of plateau zokor new mound in alpine meadow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 58−63.]
[34] 陆阿飞. 三江源区河南县草地植被退化状况及解决措施[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2014, 44(6): 57−58. [Lu Afei. Degradation of grassland vegetation and its solution in Henan County, Sanjiangyuan Region[J]. Chinese Qinghai Journal of Animal Science and Veterinary Sciences, 2014, 44(6): 57−58.]
[35] 李延林, 许存平, 许显花. 近 50 a 青海黄南州降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 854−861. [Li Yanlin, Xu Cunping, Xu Xianhua. Analysis on precipitation in Huangnan Qinghai Province in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 854−861.]
[36] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2013, 24: 72−80.
[37] 罗利芳, 张科利, 孔亚平, 等. 青藏高原地区水土流失时空分异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 58−62. [Luo Lifang, Zhang Keli, Kong Yaping, et al. Temporal and spatial distribution of soil loss on Tibet-Qing Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(1): 58−62.]

[38] 张春来, 宋长青, 王振亭, 等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 27-41. [Zhang Chunlai, Song Changqing, Wang Zhenting, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 27-41.]

[39] 王萍, 胡文文, 郑晓静. 沙粒的跃移与悬移[J]. 中国科学(G辑: 物理学 力学 天文学), 2008, 38(7): 908-918. [Wang Ping, Hu Wenwen, Zheng Xiaojing. Saltation and suspension of sand grains [J]. Science in China (Series G: Physics, Mechanics and Astronomy), 2008, 38(7): 908-918.]

[40] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York, USA: Chapman and Hall, 1941.

Soil wind erosion rule of two types of rodent mounds in a degraded grassland area of the Yellow River source zone

ZHAI Hui[1], LI Guorong[1,2], LI Jinfang[1], ZHU Haili[1,2], ZHAO Jianyun[1,2], LIU Yabin[1,2], CHEN Wenting[1,2], HU Xiasong[1,2]

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;
2. Key Laboratory of Cenozoic Resource & Environment in Northern Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: To clarify the characteristics and rules of soil wind erosion of rodent mounds in alpine grassland, studies were conducted on the *Ochotona curzoniae* and *Eospalax baileyi* mounds of He’nan County in Qinghai Province. The characteristics and rules of soil wind erosion and nutrient loss of the two types of rodent mounds were analyzed through a field-simulated wind erosion test, and the differences in soil wind erosion between the two types of rodent mounds were also compared and analyzed. The results of this analysis provide a theoretical basis for elucidating the characteristics of soil loss in rodent-infested degraded areas and reveal the degradation mechanism as well as the possible ways to protect the grassland ecological environment in the Yellow River Source Zone. The key results are as follows: (1) Under the action of 9 $m \cdot s^{-1}$ constant wind speed erosion, the loss of soil particles was concentrated in the first 15 min, and the soil loss of the *Ochotona curzoniae* mound was significantly higher than that of the *Eospalax baileyi* mound, which was approximately 1.5 times that of the *Ochotona curzoniae* mound. (2) With respect to the form of soil erosion, the amount of soil lost from the mounds was in the following order: surface creep > saltation > suspension, and the amount of soil lost in each of these forms in the *Ochotona curzoniae* mound was 1.45, 1.58, and 1.50 times the corresponding values in the *Eospalax baileyi* mound. (3) The nutrient content of the rodent mound soil was significantly lower than that of the original meadow soil; the order of nutrient content was original meadow soil > *Ochotona curzoniae* mound soil > *Eospalax baileyi* mound soil. (4) The soil nutrient loss law was similar to that of the rodent mounds, and the nutrient loss mainly depended on the degree of soil loss. The soil nutrient loss of the *Ochotona curzoniae* mound was 1.42-3.53 times higher than that of the *Eospalax baileyi* mound.

Keywords: the Yellow River source zone; degraded grassland area; mounds; soil wind erosion; nutrient loss